解　説

放射化学分析における金属イオン分離のための抽出クロマトグラフィー樹脂の開発

抽出クロマトグラフィー樹脂（レジン）は放射性核種や金属イオンの分析，同位体の定量などの前処理に広く使われている。これらのレジンは，溶媒抽出，イオン交換，共沈などの分離方法に比べ，選択性を高め，廃液の発生量を減らし，より簡単で迅速な分離を行うことを目的として開発されてきた。本稿では，この抽出クロマトグラフィーについて，抽出剤や希釈剤，固体サポートなどを含めて，わかりやすく解説する。

マカリスター ダニエル，黒 嵜　拓，ハッペル ステファン，ホーウィッツ E. フィリップ　（日本語訳　黒嵜　拓）

1　はじめに

抽出クロマトグラフィー，または逆相分配クロマトグラフィーとは，通常，極性を持つ水性の移動相と，疎水性の固定相を用いる分離技術のことを指す[1]。固定相の基材となるサポート物質には，溶媒抽出における有機相に似た疎水性の抽出剤が化学結合なしでコーティングされている。またこの固定相には，抽出特性を向上させるために，特定の希釈剤や相変換剤が含まれていることもある。

溶媒抽出は，選択性と汎用性を併せ持つ手法であり多くの抽出系がすでに確立されている。抽出クロマトグラフィーは，溶媒抽出の特性を持ち，クロマトグラフィーのように取り扱いが容易であるという特徴がある[2)3)]。さらに，昇華，再結晶，共沈，溶媒抽出やイオン交換などといった従来の手法に比べて迅速な分離が可能である。加えて，高純度かつ安全な物質を用いており，廃棄物の発生が少ない，といった様々な利点がある。一方，短所としては，交換容量が比較的少ないことや，水性の試料のみに適していることなどが挙げられる。とはいえ，抽出クロマトグラフィーは，適切な試料の溶解・分解法および濃縮法と組み合わせることによって，多くの種類の試料に応用できる。

抽出クロマトグラフィーは70年以上にわたり，様々な種類の化合物[4)~6)]や金属イオン[7)~10)]の分離に使われてきた。早い時代の一例としては，月面探査におけるアルファ後方散乱試料の作成[11)]，加速器試料中や核爆発の瓦礫（がれき）からの新しい超 U 元素の探索[12)13)]，また，希土類，U，Pu の分離などがあげられる[7)~10)]。アルファ線放出核種である ^{242}Cm を用いた後方散乱試料の作成においては，まず 150～230 ミリグラムの $^{241}AmO_2$ ターゲットを中性子照射して ^{242}Cm を生成させ，次に，ターゲットを溶解し，^{241}Am を $KAmO_2CO_3$ として沈殿させ取り除いた後，抽出剤 Aliquat 336 を用いた抽出クロマトグラフィーにより ^{242}Cm を精製した。この結果得られた ^{242}Cm は，99.9 % 以上の純度を持ち，^{242}Cm と ^{241}Am の放射能比は 10^7：1 であった[11)]。

新たな元素の探索を目的として，米国アルゴンヌ国立研究所にあるシンクロトロンを用いて実施された U 製ビームストップ照射試験では，破砕断片（Spallation Fragments）の再結合により，未発見の超 U 元素の生成が期待されていた[12)]。照射したビームストップを溶解した後，Di-(2-ethylhexyl)phosphate(HDEHP)，トリカプリルメチルアンモニウムクロライド，およびトリアリールアミンを用いた抽出クロマトグラフィーにより，放射性核種を分離した。その結果，Np から Md までの超 U 元素が検出されたが，これらはすべてすでに発見されているものであった。

また近年では，放射性物質を用いる年代測定や，核化学捜査を目的とした質量分析のための同位体の分離[14)~20)]，あるいは核医学で利用されている同位体または化合物の分離・精製などにも役立っている[21)~36)]。

最近 25 年間において，抽出クロマトグラフィーが最も大きく寄与した分野は，環境，生態，あるいは都市試料中の放射性物質の分析である[37)~42)]。この分野での抽出クロマトグラフィーの成功には，優れた選択性を有する抽出剤の発見，希釈剤や相変換剤の実用化，化学的に安定なサポート物質の開発，そして，試料の溶解や濃縮，またその他の分析のための前処理と抽出クロマトグラフィーの統合といったことが大きく関与している。

2　抽出剤

抽出クロマトグラフィーの選択性は，移動相の酸濃度，塩析剤や水性錯化剤の作用と，固定相に含まれる抽出剤の組み合わせに依存する。溶媒抽出や抽出クロマトグラフィーにおいては，抽出剤についての多くの研究がなされてきた。実際に使われる抽出剤は，主にその選択性によって選ばれる。この選択性は，抽出剤分子の中の極性部位と目的の金属イオンとの相互作用によって決まる。この相互作用によって，金属イオンは水性の移動相

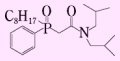
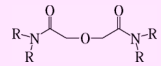
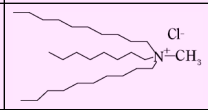
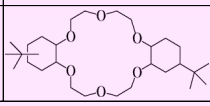
Development of Extraction Chromatography Resins for Metal Ion Separations in Analytical Radiochemistry.

からレジンの中の固定相に引き寄せられる。極性の供与基には，疎水性の置換基が結合しており，これにより抽出剤が水性の移動相に溶出して失われることを防ぐ。また，電子供与の度合い[43]，および分子全体の立体効果[44]によって選択性を微調整することもできる。置換基は，抽出剤を安定させるために十分な疎水性を持つ必要があるが，疎水性が強過ぎると逆に抽出速度が低下したり，水性の移動相と効果的に混ざらなくなることもある。

放射化学分析でよく使われる抽出剤およびその用途を表1に示す。Pu・U抽出プロセス（PUREX）で使用済み核燃料からUを回収する目的で利用されるTributyl Phosphate（TBP）は，U(VI)，Th(IV)，Pu(IV)を，三価希土類や三価アクチノイドから分離できる[45]。TBPは，分子構造の一部を変化させることで，より有用な性質を付与できる。例えば，長い炭化水素鎖を結合させることで，水相への抽出剤の損失を抑制できたり，あるいは，分岐のある炭化水素を導入することで生じる立体障害により，Th(IV)やPu(IV)に比べてU(VI)の選択性を高めることができる[44]。また，リン−酸素結合をリン−炭素結合に置き換え，ホスホネートやホスフィンオキシドにすることによって，金属イオンの保持力を強化できる[46]（図1）。

同様に，TBP[7,8]や強塩基性陰イオン交換樹脂[47]は，超Pu元素や希土類の分離に使われるが，比較的高いpH領域の溶液，高濃度の硝酸塩溶液，また，水性ではない液体の移動相を用いる必要があるなど，適用範囲が

表1　一般的な抽出クロマトグラフィー用レジンに使われる抽出剤とその用途

抽出剤	化学構造	レジン	用途
TBP		TRU/RE	相変換剤
DA[AP]		UTEVA	U(VI)
TOPO		UTEVA3	U(VI)，Th(IV)，Pu(IV)
HDEHP		LN	軽希土類
HEH[EHP]		LN2	Lu, Yb
H[DTMPP]		LN3	Y(III)，Sc(III)，Zr(IV)
CMPO		TRU/RE	U(VI)，Am(III)，Cm(III)，Rare Earths, Fe(III)
TODGA		DGA, Normal	Ac(III)，Am(III)，Cm(III)，Rare Earths, Po
Aliquat 336		TEVA	Pu(IV)，Np(IV)，Th(IV)，Tc(VII)
DtBCH18C6		Sr/Pb	Sr, Pb, Po

[1]R=2-ethyl-1-hexyl, [2]R=1-octyl, [3]R=pentyl, [4]R=2,4,4-trimethyl-1-pentyl.

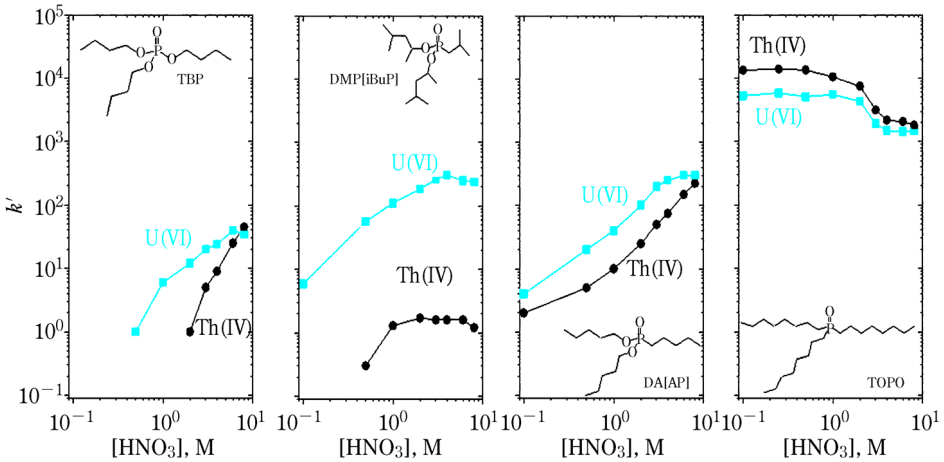


図1　アルキルリン酸エステル抽出剤を含むレジンによるU(VI)とTh(IV)の吸着：左から，TBPレジン，立体障害のあるホスホネートレジン，UTEVAレジン，UTEVA−3/TK200レジン

$$k' = D_v \times (vs/vm) \quad \cdots\cdots (1)$$

$$D_v = D_w \times d_{extr}/0.4 \quad \cdots\cdots (2)$$

$$D_w = [(A_o - A_s)/w^*sr]/(A_s/V) \quad \cdots\cdots (3)$$

ただし，k'はレジン容量係数（resin capacity factor），D_vは体積分配比（volume distribution ratio），vsおよびvmは固定相および移動相の体積，D_wは乾燥重量分配比（dry weight distribution ratio），d_{extr}は抽出剤の密度，0.4は1 g中の抽出剤の重さ（g），A_oとA_s水相における化学平衡前と後の金属イオン濃度（ppm）あるいは放射能（cpm），wはレジンの重さ（g），srはレジンの固体比，Vは水相の体積（mL）

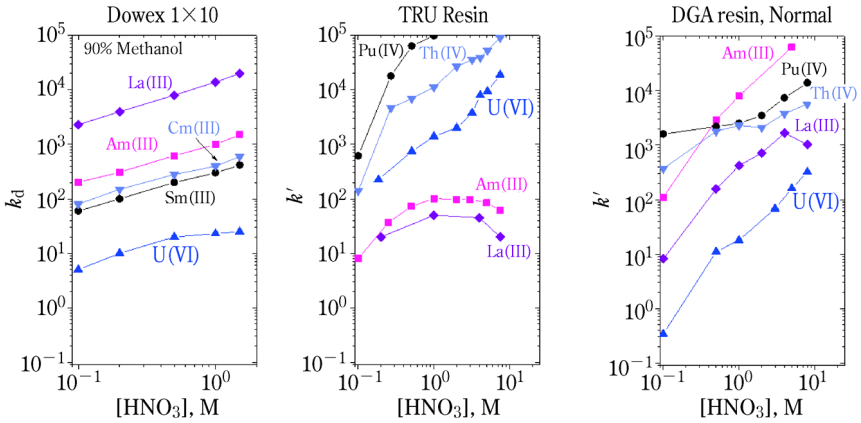


図 2　硝酸溶液中における希土類およびアクチノイドのそれぞれのレジンへの吸着

$$k_d = [(A_o - A_s)/A_s] * V/(w * F) \quad \cdots\cdots (4)$$

ただし，F＝(レジンの乾燥重量)/(使用時のレジンの重量)

限定的である。こうした条件は，使用済み核燃料を溶解した濃硝酸のような試料を用いる場合，あまり現実的ではない。超 U 元素溶媒抽出プロセス（TRUEX）で使われる Octyl(phenyl)−*N*,*N*−dibutyl carbamoylmethyl phosphine oxide（CMPO）化合物は，使用済み核燃料の再処理などにおける酸性硝酸塩溶液中での Am(III)，Cm(III)，三価希土類の分離をより効果的にするために開発された[48]。CMPO は，抽出クロマトグラフィーレジンに応用され，三価アクチノイドと希土類を，環境，生態，あるいは都市試料といった様々な試料から分離するのに効果的である[49]。

CMPO は，幅広い分野で効果的であるということが示されているが，Am(III)，Cm(III)，希土類の保持力は，U(VI)，Th(IV)，Pu(IV)，Fe(III) などの金属イオンと比べ低く（図 2），試料によっては，このことが低回収率の原因となることもある。Diglycolamine（DGA）は，Am(III)，Cm(III)，希土類の保持力を高める一方で U(VI) の保持力を弱めて，Fe(III) は保持しない抽出剤として開発された[50]。DGA を用いた抽出クロマトグラフィーは，より難しい試料中からの三価アクチノイドや希土類の分離，また，^{225}Ac，^{47}Sc や ^{44}Sc のような，核医学に用いる放射性同位体の分離などで特に注目されている[21)27)31)]。

HDEHP を使った抽出クロマトグラフィーレジンは隣り合った三価希土類や三価アクチノイドに対して，大きな分離能力を持つが，重希土類をレジンから回収するためには，高濃度の酸が必要になる。そこで，弱酸であるホスホン酸またはホスフィン酸に置き換えた HDEHP 由来の化合物が開発された。これにより，HDEHP の高い分離能力を維持したまま，Yb，Lu，Y，Sc といった元素を低酸濃度で回収できるようになった[51)52)]。これら有機リン系抽出剤は，隣り合った希土類や三価アクチノイドの分離に多く用いられている（図 3）。

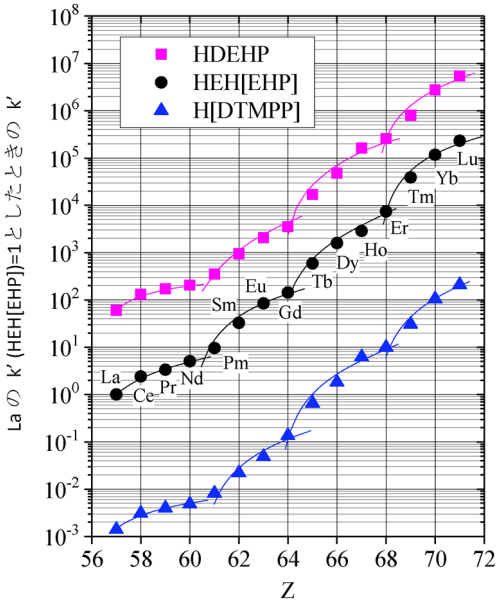


図 3　硝酸溶液中（**0.10 M**）での希土類イオンの三種類のレジンへの吸着（**HEH**[**EHP**] 中の **La** のデータを **1** とした相対値）

古くから使われている Sr や Pb の分離手法では，発煙硝酸や硫化水素などの危険な薬品を使った共沈法などが用いられている。また，必要な純度を得ようとすると，この操作を繰り返す必要があり，多量の廃液が発生する[53]。Sr 抽出プロセス（SREX）で用いられる 4,4′(5′)−di−*t*−butylcyclohexano 18−crown−6 のようなクラウンエーテル抽出剤の開発により，比較的低濃度の硝酸溶液で，Sr や Pb が抽出分離できるようになった。また，アルカリ，アルカリ土類金属からの分離も効果的に行われ，廃液の発生量も少なく，より安全に行えるという特徴もある[54)55)]。これを抽出クロマトグラフィーに応用することにより，効率の良い Sr や Pb の分離，Po の放射化学分析[56]，質量分析計による鉛同位体の迅速

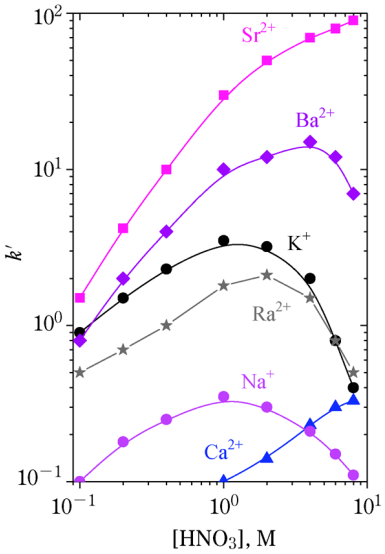


図 4　金属イオンの Sr レジンの吸着

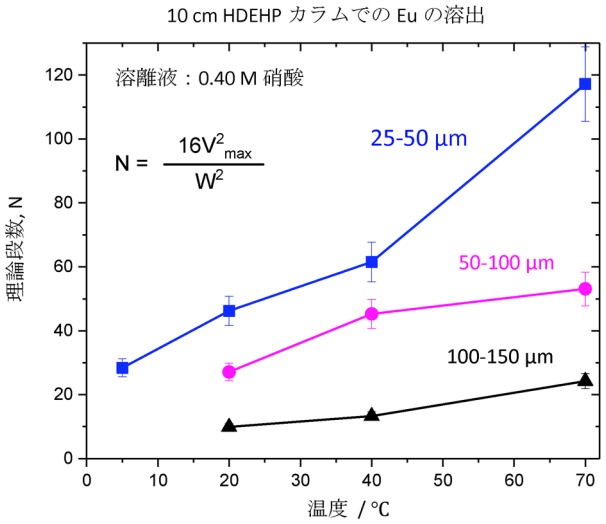


図 5　多孔性メタクリル酸サポート物質の粒径が理論段数に与える影響

分析[19]，^{90}Y[25] や ^{82}Sr–^{82}Rb[29] のような核医学で利用される同位体の生成ができるようになった。

3　希釈剤および相変換剤

理想的な抽出剤には，いくつかの条件がある。例えば，供与基と疎水性の置換基を組み合わせた際に必要な選択性を持つこと，比較的粘性の低い液体であること，サポート物質に均一にコーティングできること，またそこからはがれないこと，そして迅速な抽出ができること，などである。しかし，実際には，レジンの物理的及び化学的性質を向上させるために，添加剤が必要なことが多い。

例えば，TRU レジンおよび RE レジンに用いられる CMPO は，アクチノイドおよび三価希土類に高い選択性を示す。しかし，CMPO は固体であるため，無希釈では抽出クロマトグラフィーに適用できない。そこで，CMPO を TBP で希釈することにより，固体サポート物質に均一にコーティングできるようになり，迅速に金属イオンの分離が可能となる[57][58]。

同様に，Sr レジンおよび Pb レジンに用いられている抽出剤 4,4′(5′)–di–*t*–butylcyclohexano 18–crown–6 は，Sr と Pb に高い選択性を示すが，粘性の高い液体，あるいはロウのような固体である。ところが，このクラウンエーテルを 1–オクタノールまたは 2–デカノールに溶解させてから固定相にコーティングすると，水性移動相から抽出レジンへの Sr イオンおよび Pb イオンの移動が促進され，結果として抽出速度が高まる[59]。

4　固体サポート

レジンに使われる固体サポート物質の化学的性質や物理的構造は抽出クロマトグラフィーの性能に影響する。初期の抽出クロマトグラフィーにおいては，珪藻土やシリカのような多孔性の無機サポート物質が用いられていた。これらの物質は，高圧下や放射線場で安定して使用可能であるが，目的外の金属イオンを酸性の水相に抽出してしまうことがある。また，これらのサポート物質では，フッ化水素酸のような移動相が使えない，粒径分布が広く厳密な球状ではないため，溶出バンドが理想的な形にならない，といった弱点がある[60]。

スチレンジビニルベンゼン（SDVB）共重合体，ポリテトラフルオロエチレン（PTFE），メタクリル酸重合体のようなサポート物質は，放射線に対しては先ほどの固体サポート物質ほど安定ではないが，酸性溶液に対しては耐性があり，多くの分析用途で使うことができる。SDVB 共重合体と PTFE サポートは疎水性が強いため水溶液で濡らすことは難しく，抽出速度が遅くなる。一方メタクリル酸サポートは，そのようなことがなく，抽出速度も速い。最新のポリマーサポートおよびシリカサポートは，厳密な球状であり，粒径をそろえることができるので，溶出バンドも理想的な形になる。

固体サポートの上にコーティングできる抽出剤の量は，サポート中に存在する細孔の存在割合（空孔率）に比例する。このため，空孔率の高いサポート物質（40～55 %）は大きい容量を示す。この容量を超えるほど多量の抽出剤は加えない（オーバーロードしない）ほうがよいと考えられる。もしオーバーロードすると，抽出速度が遅くなったり，溶出バンドが広がったりする。オーバーロードによりバンドが広がるのは，細孔の中へ金属イオンが拡散するのに余分な時間がかかるためである。逆に，空孔率の低いサポート物質や，孔のないものは，キャパシティは低くなるが，その分とてもシャープな溶出バンドと高い分解能を示す[59]。溶出バンドを小さく，よりシャープにするには，必要に応じて粒径の小さいサポートを選び（図 5），移動相の温度を上げれば

よい[22]。

5　抽出クロマトグラフィーを用いた手法など

抽出クロマトグラフィーレジンは多くの金属イオンの分離に使えるが，その適用範囲は，水溶液試料，もしくは，水溶液の状態に化学処理された試料に限られる。というのは，試料マトリクスに有機溶媒が用いられている場合，サポート物質にコーティングされた疎水性の抽出剤がはがれてしまうからである。また，水性試料であっても，そこに有機溶媒や固体が混ざっていると，移動相の流れが妨げられ，抽出速度が遅くなったり，溶出がうまくいかなかったりする。そのため，効果的な分析手法を確立するためには，固体試料や有機物を分解し水溶液にするステップと抽出クロマトグラフィーをうまく組み合わせる必要がある[37)~42)]。

理想的には，酸を用いた完全溶解や固体塩を用いた融解など，分析対象をすべて回収できる手法が望ましい。しかし，場合によっては酸による抽出だけで十分なこともある。また，試料に含まれる有機物の分解には，高温で燃焼させたり，酸や過酸化水素と反応させたり，あるいはフェントン反応のようなほかの酸化剤を使うこともできる[61)]。

いったん固体試料が溶解され，有機物は分解され，また水性試料から固体が取り除かれれば，分析対象は，共沈という手法を使って，その他の構成物質から濃縮できる。共沈は，体積の大きな試料，高濃度の塩が共存し抽出クロマトグラフィーの分離性能に影響するような試料について，特に有用である。共沈には溶解度の低い化合物が用いられる。共沈に理想的な化合物の要件としては，水溶液中での溶解度が低いこと，効果的に分析対象を取り込みつつ不要な不純物は沈殿させないこと，その後のステップで容易に溶解できること，などが挙げられる。共沈で使われる一般的な担体を，その担体が共沈する分析対象，および分離することができる金属イオンとともに，次の表 2 に示す[62)]。

抽出クロマトグラフィーは，多くの場合，まず共沈によって沈殿を生成させ，その沈殿を溶解した後に行う。この沈殿は，硝酸で溶解することが多く，しばしば非常に高濃度の硝酸や硝酸アルミニウムが用いられることがある（リン酸イオンあるいは硫酸イオンと分析対象イオンの錯形成を防ぐことが目的）。また，フッ化物イオンを取り除くためにホウ酸を使ったり，酸化剤や還元剤を加えて分析対象の金属イオンが必要な酸価数となるよう調整することもある。こうしてできた水性試料は，必要であれば沪過したり遠心分離したりして，不溶性固体成分を取り除く。得られた試料溶液は，抽出クロマトグラフィーレジンカラムに通過させ，様々な溶出条件を設定することによって不純物が除去され，最終的に分析対象が溶出される。こうして得られた高純度，高収率の分析対象は，それぞれの測定に最適な化学形態に調整され，測定される。

表 2　アクチノイドおよび希土類の共沈法

沈 殿	共沈金属イオン	非共沈イオン	備　考
リン酸カルシウム	アクチノイド(III, IV, V, VI)，希土類(III)，Fe(III)，Sr(II)	Na(I)，K(I)	アクチノイド分離
水酸化鉄(III)	アクチノイド(III, IV, V, VI)，希土類(III)	Na(I)，K(I)，Mg(II)，Ca(II)，Sr(II)，Ba(II)	海水からのアクチノイドの分離等
フッ化ランタン	アクチノイド(III, IV)，希土類(III)	アクチノイド(VI, V)，Sr(II)，Ba(II)	シリカを含む試料等

6　ま と め

70 年以上にわたり開発が続けられている抽出クロマトグラフィー物質，およびその手法は，周期表のほぼすべての金属イオンの分析手法の改善に役立っている。中でも新しい抽出剤の開発，希釈剤や相変換剤の実用化，新しい固体サポート物質の開発，抽出クロマトグラフィーと他の分離手法の統合が，この発展に大きく寄与している。有用性や柔軟性により，抽出クロマトグラフィーは様々な分野で，今後の金属イオンの分離技術の確立に役に立っていくであろう。

文　献

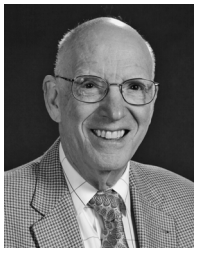
1) J. C. Giddings : *"Unified Separation Science"*, (1991), (John Wiley and Sons, Inc. New York).
2) E. P. Horwitz, D. R. McAlister, M. L. Dietz : *Sep. Sci. and Technol.*, **41**, 2163 (2006).
3) M. Torre, M. L. Marina : *Crit. Rev. Analy. Chem.*, **24**, 327 (1994).
4) G. A. Howard, A. J. P. Martin : *Biochem. J.*, **46**, 532 (1950).
5) M. H. Silk, N. H. Hahn : *Biochem. J.*, **56**, 406 (1954).
6) J. B. Wittenberg : *Biochem. J.*, **65**, 42 (1957).
7) S. Siekierski, I. Fidelis : *J. Chromatogr.*, **4**, 60 (1960).
8) I. Fidelis, S. Siekierski : *J. Chromatogr.*, **5**, 161 (1961).
9) R. Gwozdz, S. Siekierski : *Nukleonika*, **5**, 671 (1960).
10) W. C. Dietrich, J. D. Caylor, E. E. Johhson : *U.S. Atomic Energy Comm.*, Y-1322, 1 (1960).
11) J. H. Patterson, H. E. Griffin, E. P. Horwitz, C. A. A. Bloomquist : *Nucl. Technol.*, **18**, 277 (1973).
12) E. P. Horwitz, C. A. A. Bloomquist : *J. Inorg. Nucl. Chem.*, **37**, 425 (1975).
13) E. P. Horwitz, C. A. A. Bloomquist, H. W, Harvey, J. C. Hoh : Argonne National Laboratory Report ANL-7134 (1966).
14) N. H. Gale : *Analy. Chim. Acta*, **332**, 15 (1996).
15) M. E. Ketterer, S. C. Szechenyi : *Spectrochim. Acta. Part B: Atomic Spectroscopy*, **63**, 719 (2008).
16) C. Pin, C. Bassin : *Anal. Chim. Acta*, **269**, 249 (1992).
17) J. N. Connelly : *Chemical Geology*, **233**, 126 (2006).

18) Z. Varga, G. Suranyi : *Appl. Radiat. Isot*. **67**, 516 (2009).
19) D. L. Moir, D. L. Joseph : *J. Radioanal. Nucl. Chem*., **220**, 195 (1997).
20) N. H. Gale : *Anal. Chim. Acta*, **332**, 15 (1996).
21) E. P. Horwitz, D. R. McAlister, A. H. Bond, R. E. Barrans Jr. : *Solv. Extr. Ion Exch*., **23**, 319 (2005).
22) E. P. Horwitz, D. R. McAlister, A. H. Bond, R. E. Barrans Jr., J. M. Williamson : *Appl. Radiat. Isot*., **63**, 23 (2005).
23) D. R. McAlister, E. P. Horwitz : *Appl. Radiat. Isot*., **67**, 1985 (2009).
24) M. Li, X. Zhang, T. Quinn, D. Lee, D. Liu, F. Kunkel, B. Zimmerman, D. R. McAlister, K. Olewein, Y. Menda, S. Mirzadeh, R. Copping, F. L. Johnson, M. K. Shultz : *Appl. Radiat. Isot*., **127**, 52 (2017).
25) M. L. Dietz, E. P. Horwitz : *Ind. Eng. Chem. Res*., **39**, 3181 (2000).
26) E. P. Horwitz, A. H. Bond : *Czech. J. Phys*., **53**, Suppl. A., A713 (2003).
27) V. Radchenko, J. W. Engle, J. J. Wilson, J. R. Massen, F. M. Nortier, W. A. Taylor, E. R. Birnbaum, L. A. Hudston, K. D. John, M. E. Fassbender : *J. Chromatogr. A*., **1380**, 55 (2015).
28) D. Zeng, C. J. Anderson : *Solv. Extr. Ion Exch*., **31**, 337 (2013).
29) A. V. Dunin, N. A. Nerozin, N. R. Togaeva, S. V. Khamyanov, V. V. Shapovalov : *Pharmaceutic. Chem. Journal*, **48**, 395 (2014).
30) G. H. Henriksen, P. Hoff, J. Alstaad, R. H. Larsen : *Radiochim. Acta*, **89**, 661 (2001).
31) C. K. Vyas, J. H. Park, S. D. Yang : *J. Radiopharmaceutic. Molec. Probes*, **2**, 84 (2016).
32) H. F. Valdovinos, R. Hernandez, T. E. Barnhart, S. Graves, W. Cai, R. J. Nickles : *Appl. Radiat. Isot*., **95**, 23 (2015).
33) V. Radchenko, C. A. L. Meyer, J. W. Engle, C. M. Naranjo, G. A. Unc, T. Mastren, M. Brugh, E. R. Birnbaum, K. D. John, F. M. Nortier, M. E. Fassbender : *Nucl. Medic. Biol*., **50**, 25 (2017).
34) C. Dirks, B. Scholten, S. Happel, A. Zulauf, A. Bombard, H. Jungclas : *J. Radioanal. Nucl. Chem*., **286**, 671 (2010).
35) S. Riga, G. Cicoria, D. Pancaldi, F. Zagni, S. Vichi, M. Dassenno, L. Mora, F. Lodi, M. P. Morigi, M. Marengo : *Physica Medica*, **55**, 116 (2018).
36) Y. Tang, Y. Hua, W. Liu, L. Chen, Y. Zhao, H. Ma, J. Yang, Y. Yang, J. Liao, J. Cai, Y. Chen, N. Liu : *Nucl. Medic. Biol*., **70**, 23 (2019).
37) S. L. Maxwell, B. K. Culligan, J. B. Hutchison, R. C. Utsey, D. R. McAlister : *Radioanal. Nucl. Chem*., **298**, 1977 (2013).
38) S. L. Maxwell, B. K. Culligan, J. B. Hutchison, R. C. Utsey, D. R. McAlister : *Radioanal. Nucl. Chem*., **300**, 1175 (2014).
39) S. L. Maxwell, B. K. Culligan, J. B. Hutchison, R. C. Utsey, D. R. McAlister : *Radioanal. Nucl. Chem*., **300**, 1159 (2014).
40) S. L. Maxwell, B. K. Culligan, J. B. Hutchison, R. C. Utsey, D. R. McAlister : *Radioanal. Nucl. Chem*., **303**, 709 (2015).
41) S. L. Maxwell, B. K. Culligan, J. B. Hutchinson, D. R. McAlister : *Radioanal. Nucl. Chem*., **305**, 599 (2015).
42) S. L. Maxwell, B. K. Culligan, J. B. Hutchinson, D. R. McAlister : *Radioanal. Nucl. Chem*., **305**, 631 (2015).
43) E. P. Horwitz, K. A. Martin, H. Diamon, L. Kaplan : *Solv. Extr. Ion. Exch*., **4**, 449 (1986).
44) G.W. Mason, H.E. Griffin : *"Demonstration of the Potential for Designing Extractants with Preselected Extraction Properties: Possible Application to Reactor Fuel Processing"*, in Actinide Separations, Eds. James Navritil and Wallace Shulz, pp 89–99, (1980), (American Chemical Society).
45) J. M. McKibben : "Chemistry of the PUREX Process", Proceedings of the American Chemical Society, 135th Meeting, March 20–25, 1983, Seattle, WA. Invited paper for session on "Chemistry of the Nuclear Fuel Cycle", DPSPU–83–272–1.
46) M. L. Dietz, E. P. Horwitz, L. R. Sajdak, R. Chiarizia : *Talanta*, **54**, 1173 (2001).
47) J. P. Faris, R. F. Buchanan : Argonne National Laboratory Report ANL–6811 (1964).
48) E. P. Horwitz, D. G. Kalina, H. Diamond, G. F. Vandergrift : *Solv. Extr. Ion Exch*., **3**, 75 (1985).

マカリスター　ダニエル
(Daniel McAlister)
Eichrom Technologies, LLC アイクロムテクノロジーズ（1955 University Lane, Lisle, IL 60532 USA）。Loyola University Chicago 修了。PhD in Analytical Chemistry。≪現在の研究テーマ≫Metal Ion Separations。≪趣味≫Reading Novels, Golf, Softball。
E-mail : dmcalister@eichrom.com

黒嵜　拓（Hiromu Kurosaki）
UT–Battelle/Oak Ridge National Laboratory 米国オークリッジ国立研究所（P.O. Box 2008 M.S. 6107, Oak Ridge, TN, 37831–6105, USA）。Washington State University 修了。PhD in Chemistry。≪現在の研究テーマ≫Radiobioassay of actinides and fission products, and others nuclides used in ORNL。≪趣味≫Running, Photography。
E–mail : kurosakih@ornl.gov

ハッペル　ステファン
(Steffen A. Happel)
TrisKem International トリスケムインターナショナル（3 rue des Champs Geons, 35170 Bruz, France）。Philipps University Marburg (Germany) 修了。PhD。≪現在の研究テーマ≫Separation chemistry, development of new separation materials and methods。≪趣味≫walks, reading, soccer, music。
E–mail : shappel@triskem.fr



ホーウィッツ　**E.** フィリップ
(E. Philip Horwitz)
Retired from Eichrom Technologies, LLC アイクロムテクノロジーズ（退職）（1955 University Lane, Lisle, IL 60532 USA）。University of Illinois 修了。PhD in Analytical Chemistry。≪現在の研究テーマ≫Retired。≪趣味≫gardening, ship models。

49) E. P. Horwitz, R. Chiarizia, M. L. Dietz, H. Diamond, D. M. Nelson : *Anal. Chim. Acta*., **281**, 361 (1993).
50) Y. Sasaki, Y. Sugo, S. Suzuki, S. Tachimori : *Solv. Extr. Ion Exch*., **19**, 91 (2001).
51) D. R. McAlister, E. P. Horwitz : *Solv. Extr. Ion Exch*., **25**, 757 (2007).
52) P. R. Danesi, L. Reichley−Yinger, G. Mason, L. Kaplan, E. P. Horwitz, H. Diamon : *Solv. Extr. Ion Exch*., **3**, 435 (1985).
53) E. Turk : Argonne National Laboratory Report ANL−5184 (1953).
54) E. P. Horwitz, M. L. Dietz, D. E. Fisher : *Solv. Extr. Ion Exch*., **8**, 557 (1990).
55) E. P. Horwitz, R. Chiarizia, M. L. Dietz : *Solv. Extr. Ion Exch*., **10**, 313 (1992).
56) T. Muira, K. Hayano, K. Nakayama : *Analy. Sci*., **15**, 23 (1999).
57) E. P. Horwitz, D. G. Kalina : *Solv. Extr. Ion Exch*., **2**, 179 (1984).
58) E. P. Horwitz, K. A. Martin, H. Diamon : *Solv. Extr. Ion Exch*., **6**, 859 (1988).
59) E. P. Horwitz, M. L. Dietz, D. E. Fisher : *Solv. Extr. Ion Exch*., **8**, 557 (1990).
60) E. P. Horwitz, C. A. A. Bloomquist : *J. Inorg. Nucl. Chem*., **35**, 271 (1972).
61) C. Walling : *Accounts Chem. Res*., **8**, 125 (1975).
62) K. L. Nash, C. Madic, J. N. Mathur, J. Lacquement : "Actinide Separation Science and Technology" In The Chemistry of the Actinide and Transactinide Elements, 3rd Ed., Volume 4, Edited by L. Morse, N. Edelstein, J. Fuger, J. J. Katz, p. 2622 (2006), (Springer, Netherlands).

原　稿　募　集

創案と開発欄の原稿を募集しています

内容：新しい分析方法・技術を創案したときの着想，新しい発見のきっかけ，新装置開発上の苦心と問題点解決の経緯などを述べたもの。但し，他誌に未発表のものに限ります。

執筆上の注意：1）会員の研究活動，技術の展開に参考になるよう，体験をなるべく具体的に述べる。物語風でもよい。2）従来の分析方法や装置の問題点に触れ，記事中の創案や開発の意義，すなわち主題の背景を分かりやすく説明する。3）図や表，当時のスケッチなどを用いて理解しやすくすることが望ましい。4）原稿は図表を含めて4000～8000字（図・表は1枚500字に換算）とする。

◇採用の可否は編集委員会にご一任ください。原稿の送付および問い合わせは下記へお願いします。

〒141−0031　東京都品川区五反田1−26−2
五反田サンハイツ304号
(公社)日本分析化学会「ぶんせき」編集委員会
〔電話：03−3490−3537〕